

# PROBLEMAS RESUELTOS

## Balance de Energía

**EJEMPLO 1.6-1. Calentamiento de un Medio de Fermentación**

Un medio de fermentación líquido a 30°C se bombea a velocidad de 2 000 kg/hr a través de un calentador, donde su temperatura se eleva a 70°C bajo presión. El agua caliente de desperdicio usada para el calentamiento entra a 95°C y sale a 85°C. La capacidad calorífica promedio del medio de fermentación es 4.06 kJ/kg·K, y la del agua, 4.21 kJ/kg·K

Las corrientes de fermentación y de agua caliente están separadas por una superficie metálica a través de la cual se transfiere el calor y que impide la mezcla física de ambas. Establézcase un balance de calor completo para el sistema. Calcúlense el flujo de agua y la cantidad de calor añadida al medio de fermentación, suponiendo que no hay pérdidas en el sistema. En la Fig. 1.6-1 se muestra el flujo del proceso.

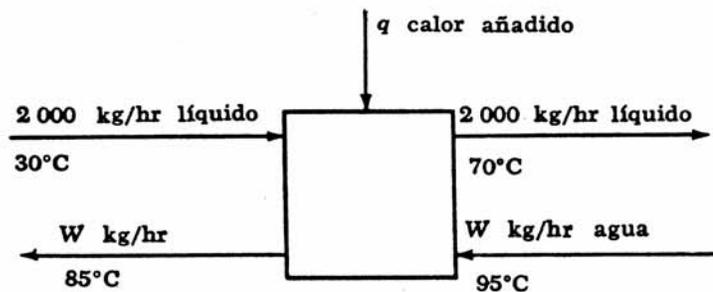


FIGURA 1.6-1. Diagrama de flujo del proceso para el Ej. 1.6-1

**Solución:** Es conveniente usar el estado normal de referencia a 298 K (25°C) como base para el cálculo de las diversas entalpías. De acuerdo con la Ec. (1.6-1), los términos de la expresión son los siguientes:

*Términos de entrada.*  $\Sigma H_R$  de las entalpías de las dos corrientes con respecto a 298 K (25°C) (nótese que  $\Delta t = 30 - 25^\circ\text{C} = 5^\circ\text{C} = 5\text{ K}$ ):

$$H(\text{líquido}) = (2\,000\text{ kg/hr})(4.06\text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(5\text{ K}) \\ = 4.060 \times 10^4\text{ kJ/hr}$$

$$H(\text{agua}) = W(4.21)(95 - 25) = 2.947 \times 10^2 W\text{ kJ/hr} \quad (W = \text{kg/hr})$$

$$(-\Delta H^\circ_{298}) = 0 \quad (\text{puesto que no hay reacción química})$$

$$q = 0 \quad (\text{puesto que no hay adiciones o pérdidas de calor})$$

**Términos de salida.**  $\Sigma H_p$  de las dos corrientes con respecto a 298 K (25°C):

$$H (\text{líquido}) = 2\,000(4.06)(70 - 25) = 3.65 \times 10^5 \text{ kJ/hr}$$

$$H (\text{agua}) = W(4.21)(85 - 25) = 2.526 \times 10^2 W \text{ kJ/hr}$$

Igualando entradas y salidas en la Ec. (1.6-1) y despejando  $W$ ,

$$4.060 \times 10^4 + 2.947 \times 10^2 W = 3.654 \times 10^5 + 2.526 \times 10^2 W$$

$$W = 7\,720 \text{ kg/hr de flujo de agua}$$

La cantidad de calor que se ha agregado al medio de fermentación es simplemente la diferencia de las entalpías de los líquidos de salida y entrada:

$$\begin{aligned} H (\text{líquido de salida}) - H (\text{líquido de entrada}) &= 3.654 \times 10^5 - 4.060 \times 10^4 \\ &= 3.248 \times 10^5 \text{ kJ/hr (90.25 kW)} \end{aligned}$$

Obsérvese en este ejemplo que, puesto que se supuso que las capacidades caloríficas son constantes, se podría haber escrito un balance más simple como éste:

calor ganado por el líquido = calor perdido por el agua

$$2000(4.06)(70 - 30) = W(4.21)(95 - 85)$$

Entonces, resolviendo la expresión,  $W = 7\,720 \text{ kg/hr}$ .

**EJEMPLO 1.6-3. Resolución por Aproximaciones Sucesivas Para un Calentamiento de Aire**

Un flujo de 5.55 mol lb de aire a 85°F y 1 atm abs de presión se está calentando con vapor en un intercambiador de calor. (El aire y el vapor no se mezclan.) El condensado de vapor que se obtiene pesa 5.0 lb a 300°F y 66.98 lb/plg<sup>2</sup> abs y el agua sale a 300°F y 66.98 lb/plg<sup>2</sup> abs. Calcúlese la temperatura del aire de salida suponiendo que no hay pérdidas de calor. (Se advirtió que este problema deberá resolverse con aproximaciones sucesivas.)

**Solución:** En la Fig. 1.6-3 se muestra el diagrama de flujo del proceso. La temperatura base será 77°F (25°C).

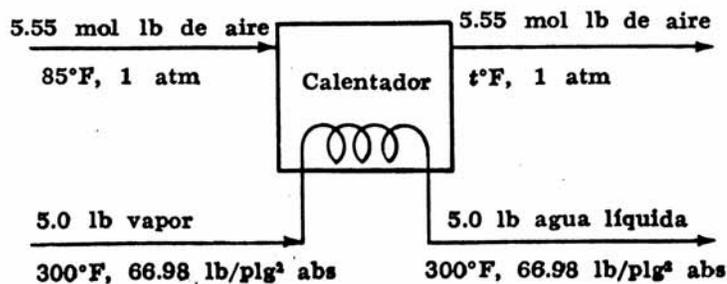


FIGURA 1.6-3. Diagrama de flujo del proceso para el Ej. 1.6-3

**Términos de entrada**

$$H(\text{aire}) = (5.55 \text{ mol lb}) \left( c_{pm} \frac{\text{btu}}{\text{mol lb} \cdot ^\circ\text{F}} \right) (85 - 77) ^\circ\text{F}$$

$$= (5.55)(6.98)(85 - 77) = 309.9 \text{ btu}$$

(El  $c_{pm}$  del aire se obtiene de la Tabla 1.5-1 a 85°F o 29.4°C.)

$$H(\text{vapor}) = 5[1180.2 \text{ (a } 32^\circ\text{F)} - 45.09 \text{ (a } 77^\circ\text{F)}]$$

(El valor de 1180.2 btu/lb<sub>m</sub> se obtiene de las tablas de vapor y está referido a 32°F. El valor de 45.09 btu/lb<sub>m</sub> es la entalpía del agua líquida entre 77°F y 32°F. Este valor corrige los datos a una base de 77°F.)

$$q = \text{calor añadido} = 0$$

*Términos de salida*

$$H(\text{aire}) = 5.55(c_{pm})(t - 77)$$

$$H(\text{agua}) = 5[269.73 \text{ (a } 32^\circ\text{F)} - 45.09 \text{ (a } 77^\circ\text{F)}]$$

Estableciendo que entradas = salidas y resolviendo,

$$309.9 + 5(1180.2 - 45.09) = 5.55(c_{pm})(t - 77) + 5(269.73 - 45.09)$$

$$4863.4 = 5.55(c_{pm})(t - 77) \quad (1.6-2)$$

Nótese que el factor de 45.09 btu/lb<sub>m</sub> que corrige la tabla de vapor a una base de 77°F, aparece en ambos lados de la ecuación y podría haberse omitido.

La solución se obtiene por aproximaciones sucesivas. Estimando una  $t$  de 250°F (121.1°C),  $c_{pm} = 7.01$  (de las tablas). Sustituyendo en la Ec. (1.6-2) y despejando,  $t = 201.8^\circ\text{F}$ . Para la segunda aproximación, con  $t = 200^\circ\text{F}$  (93.3°C),  $c_{pm} = 7.00$ . Resolviendo,  $t = 202.0^\circ\text{F}$  (94.4°C). El valor de  $c_{pm}$  cambia muy poco, por lo que sólo son necesarias dos aproximaciones.